

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Informatiky

Modul pro testování elektrických obvodů
Test Module for Electrical Circuits

2012

Michal Smejkal

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Smejkal**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2612R025 Informatika a výpočetní technika
Téma: Modul pro testování elektrických obvodů
Test Module for Electrical Circuits

Zásady pro vypracování:

Velkou pomoc při výuce studentů nabízejí v dnešní době různé LMS systémy. Jednou z jejich součástí jsou možnosti určené studentům k ověřování jejich vlastních znalostí. Cílem této práce je vytvořit testovací modul zaměřený na schémata používaná při návrhu elektrických obvodů, který bude sloužit k jejich automatickému testování.

1. Seznamte se s problematikou testování a automatického vyhodnocování v e-learningových systémech.
2. Navrhněte a implementujte výukový a testovací modul, který bude využíván pro výuku a testování základních elektrických obvodů.
3. Modul navrhněte tak, aby bylo možné jej dále rozšiřovat a modifikovat.
4. Výsledný modul navrhněte tak, aby jej bylo možné implementovat v LM systémech.
5. Funkčnost výsledného modulu ověřte na vzorku studentů.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Němec, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Dr. Ing. Eduard Sojka
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 15. srpna 2012


.....
Michal Smejkal

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu této bakalářské práce Ing. Martin Němec, Ph.D. a Ing. Zdeněk Slanina, Ph.D. za jejich čas a ochotu, a rovněž připomínky k řešené problematice.

Abstrakt

Cílem práce je vytvořit testovací modul, který bude sloužit k analýze elektrických obvodů a jejich automatickému testování. Základním požadavkem je testování jak stejnosměrných, tak střídavých obvodů. Důraz byl kladen na přívětivé uživatelské prostředí a možnost dalšího rozšiřování. Pro přístup k samotné aplikaci slouží webové rozhraní, kde student není omezen instalováním dalších nestandardních programů. Výhodou celé aplikace je možnost uživatele testovat své znalosti v problematice elektrických obvodů.

Klíčová slova:

Elektrické obvody, analýza elektrických obvodů, testování, vyhodnocování, LMS systém, Java, Applet

Abstract

The goal is to create test module that will be used to analyze electrical circuit and automatic testing. The basic requirement is to test both DC and AC circuits. Emphasis was placed on a user-friendly environment and the possibility of further expansion.. To access the application itself is used a web interface, where the student is not limited to installing some non-standard programs. The advantage of the whole application is the possibility of users to test their knowledge in the issues of electrical circuits.

Keywords:

Electrical circuits, Electrical circuits Analysis, testing, evaluation, LMS system, Java, Applet

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Teorie elektrotechniky	9
2.1	Elektrický obvod	9
2.2	Prvky elektrického obvodu	9
2.2.1	Rezistor	10
2.2.2	Kondenzátor	10
2.2.3	Cívka	10
2.2.4	Zdroj stejnosměrného napětí	11
2.2.5	Zdroj střídavého napětí	11
2.2.6	Elektrický spoj	12
2.2.7	Uzel elektrických spojů.....	12
2.3	Použité zákony	12
2.3.1	Ohmův zákon	12
2.3.2	První Kirchhoffův zákon.....	13
2.3.3	Druhý Kirchhoffův zákon	13
2.4	Metody řešení elektrických obvodů	14
2.4.1	Princip lineární superpozice.....	14
2.4.2	Transfigurace hvězda - trojúhelník	14
2.4.3	Metoda uzlových napětí	14
2.4.4	Metoda smyčkových proudů	15
2.4.5	Symbolicko-komplexní metoda	15
2.4.6	Příklad na řešení obvodů metodou smyčkovým proudů	16
3	Návrh softwaru.....	19
3.1	Analýza požadavků a návrh softwarového systému	19
3.1.1	Diagram aktivit.....	20
3.2	Implementace	22
3.2.1	Algoritmus vytváření smyček	22
3.2.2	Důkaz nutnosti nezávislých smyček	23
4	Ověřování výsledků.....	25
4.1	Příklad na střídavou analýzu	25

4.2	Příklad na stejnosměrnou analýzu.....	26
4.3	Porovnání	29
4.4	Testování.....	29
5	Závěr	31
	Literatura.....	32
	Příloha A	33

1 Úvod

V současné době roste potřeba rozšiřování celého vzdělávacího procesu. S velmi rychle se vyvíjejícím příchodem informačních technologií roste také zájem o elektronické vzdělávání. S požadavky na rozvoj vzdělávání rostou také požadavky na LMS systémy, jejímž účelem je poskytnout uživatelům možnost elektronického vzdělávání, rostou také nároky na možnosti těchto systémů. Jednou z možností rozšíření jsou nové funkce pro automatické testování a ověřování znalostí. Výhodou je okamžitá zpětná vazba, kdy uživatel ihned vidí, jak je úspěšný, a odpadá nutnost ověřování funkčnosti zapojení klasickou prací v laboratoři. Šetříme tím čas a prostředky při konstruování nového zapojení.

Tato práce je zaměřena na využití systému, který pracuje s elektrickými obvody, jejich analýzou, testováním a vyhodnocováním. Díky tomu odpadá nutnost ručního výpočtu, kdy se s rostoucí velikostí zapojení a rostoucím počtem smyček se stává výpočet časově velmi náročný. Hlavní výhodou je schopnost simulovat činnost vytvořeného obvodu v ustáleném stavu a testovat své znalosti bez zásahu jiné osoby. Nasazení samotné aplikace je pak převážně vhodné do středních škol, kde studenti mohou testovat své znalosti v oblasti elektrotechniky. Součástí práce je vytvoření webového rozhraní sloužící pro komunikaci s aplikací, kde je vytvořeno několik různých zadání pro možnosti testování. Zadání byly čerpány převážně z knih určených pro střední školy, proto jsou vhodné pro vypracování studenty.

Existuje celá řada simulačních programů, komerčních, tak nekomerčních, které dosahují velmi reálných výsledků. Nejvýznamnějším simulačním programem pro elektrotechniku je LTSpice. Spice umožňuje jak stejnosměrnou, tak střídavou analýzu. Mezi další programy jmenujme TinaPlus, Micro-Cap a další. Tyto simulační programy však nejsou vyvíjeny pro testovací účely, tzn. nemožnost testovat a vyhodnocovat znalosti uživatele v oblasti elektrotechniky. Proto vznikl námět na toto téma, kde hlavním cílem je nasazení aplikace mezi studenty středních škol, vytvářet testovací příklady a vyhodnocovat výsledky zapojení studentů.

V následujících odstavcích budou vysvětleny základní znalosti z oblasti elektrotechniky nutné k pochopení funkcí a metod pro analýzu elektrického obvodu. Popsán bude proces vývoje aplikace a některé algoritmy pro výpočet elektrického obvodu. Na závěr proběhne ověření dosažených výsledků a jejich porovnání s ručním výpočtem a vybranými simulačními programy.

2 Teorie elektrotechniky

Základem aplikace je nutnost analýzy a vyhodnocení elektrického obvodu. Existuje několik metod, které jsou však vhodné na různé typy elektrických obvodů. Různé typy obvodů jsou dané zejména odlišnými elektrickými prvky, které elektrický obvod obsahuje. Proto, pro pochopení principů analýzy elektrických obvodů je nutné zabývat se základním dělením elektrických obvodů a elektrických prvků.

2.1 Elektrický obvod

Elektrický obvod je vodivé spojení elektrických prvků (odporů, kondenzátorů, cívek, atd.), kde po připojení zdroje elektrické energie prochází součástkami elektrický proud. Zároveň mezi jednotlivými částmi obvodu působí elektrická napětí.

Elektrické obvody můžeme rozdělit podle několika hledisek. Uvedeme si některé z nich:

- **Podle časového průběhu obvodových veličin** - tyto elektrické obvody dělíme na stejnosměrné a střídavé. U stejnosměrného obvodu mají obvodové veličiny napětí a proud stále stejný směr. Obvodové veličiny u střídavého obvodu mění v čase velikost a směr.
- **Podle linearity** - dělíme elektrické obvody na lineární a nelineární. Lineární elektrický obvod obsahuje pouze lineární prvky, tedy takové prvky, u kterých je závislost mezi napětím a proudem a jejich derivacemi lineární. Nelineární elektrický obvod obsahuje aspoň jeden nelineární prvek (cívka, kondenzátor). U takového prvku je závislost mezi napětím a proudem a jejich derivacemi nelineární.
- **Podle provozních stavů** – se mohou elektrické obvody nacházet ve třech stavech:
 - Ustálený stejnosměrný stav – obvodové veličiny (napětí, proud) jsou v závislosti na čase konstantní.
 - Ustálený střídavý stav – obvodové veličiny se v závislosti na čase mění. Zvláštním typem je periodický ustálený stav, kdy obvodové veličiny se v závislosti na čase mění periodicky. A pokud se mění harmonicky s časem, hovoříme o harmonickém ustáleném střídavém stavu.
 - Neustálený stav – elektrický obvod je tvořen prvky, které akumulují energii (kondenzátor, cívka) a v obvodu dojde při spínání (zapínání, vypínání nebo přepínání) k přechodnému ději.

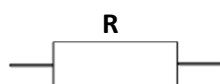
2.2 Prvky elektrického obvodu

Elektrický obvod se typicky skládá ze zdrojů elektrické energie a spotřebičů elektrické energie (rezistor, kondenzátor, cívka, apod.). Zdroje považujeme za aktivní prvky, neboť do obvodu

dodávají elektrickou energii. Spotřebiče elektrické energie považujeme za pasivní prvky, neboť elektrickou energii spotřebovávají. Dále rozlišujeme prvky na setrvačné (akumulační) a nesetrvačné. Typickým představitelem nesetrvačného prvku je rezistor. Mezi setrvačné prvky patří kondenzátor a cívka. Níže si uvedeme prvky, kterými jsou v naší aplikaci použity pro realizaci elektrického obvodu.

2.2.1 Rezistor

Rezistor je pasivní, nesetrvačná elektrická součástka, která nevratně přeměňuje elektrickou energii v energii jiné povahy (tepelnou energii). Rezistorem lze měnit velikost elektrického proudu, případně na něm vzniká úbytek napětí. Schématická značka je na obrázku 1.



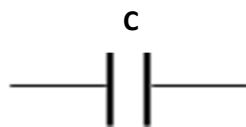
Obrázek 1. Rezistor

Parametry rezistoru:

Rezistivita (odpor) - R [Ohm - Ω]

2.2.2 Kondenzátor

Kondenzátor je pasivní, setrvačná elektrická součástka, schopná akumulovat energii ve formě elektrického pole. V obvodu se stejnosměrným zdrojem se kondenzátor při zapnutí obvodu nabíjí tak dlouho, dokud se nevyrovná elektrický potenciál na každé z desek s potenciálem příslušného pólu zdroje. Při odpojení zdroje kondenzátor do obvodu dodává energii, dokud se zcela nevybíje. V obvodu střídavého proudu se kondenzátor opakovaně nabíjí a vybíjí. U ideálního kondenzátoru v obvodech se střídavým proudem vzniká kapacitní reaktance, která s rostoucí frekvencí klesá podle vzorce $X_C = 1/\omega C$. Schématická značka je na obrázku 2.



Obrázek 2. Kondenzátor

Parametry kondenzátoru:

Kapacita - C [Farad - F], Vnitřní odpor - R [Ohm - Ω]

2.2.3 Cívka

Cívka je pasivní, akumulační elektrická součástka, schopná akumulovat energii ve formě magnetického pole. V obvodu stálého stejnosměrného proudu se cívka projevuje pouze svým

elektrickým odporem. V obvodu střídavého proudu vzniká kolem cívky proměnné magnetické pole, které v cívkce indukuje elektromotorické napětí. U ideální cívky v obvodech se střídavým proudem vzniká indukční reaktance, která roste s frekvencí podle vzorce $X_L = 2\pi fL = \omega L$. Schématická značka je na obrázku 3.



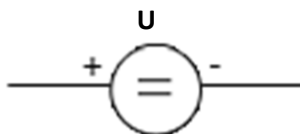
Obrázek 3. Cívka

Parametry cívky:

Indukčnost - L [Henry - H], Vnitřní odpor - R [Ohm - Ω]

2.2.4 Zdroj stejnosměrného napětí

Elektrický zdroj stejnosměrného napětí je aktivní prvek, který v ideálním případě dodává do obvodu stálou hodnotu napětí. Ideální zdroj napětí má nulovou vnitřní impedanci. Reálný zdroj napětí odpovídá sériovému spojení ideálního zdroje napětí a ideálního rezistoru s hodnotou odpovídající vnitřní impedanci reálného zdroje. Schématická značka je na obrázku 4.



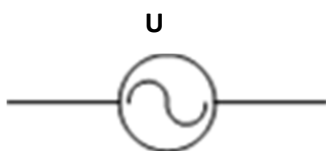
Obrázek 4. Zdroj stejnosměrného zdroje napětí

Parametry zdroje stejnosměrného napětí:

Napětí - U [Volt- V], Vnitřní odpor - R [Ohm - Ω]

2.2.5 Zdroj střídavého napětí

Elektrický zdroj střídavého napětí je aktivní prvek dodávající do obvodu elektrický proud, jehož směr se periodicky střídá. Například při běžné síťové frekvenci 50Hz se směr proudu změní každých 10 milisekund. Schématická značka je na obrázku 5.



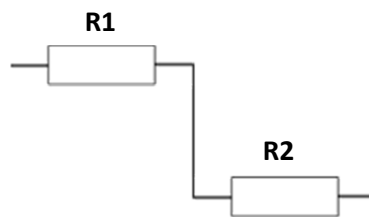
Obrázek 5. Zdroj střídavého zdroje napětí

Parametry zdroje střídavého napětí:

Napětí - U [Volt - V], Frekvence - f [Hertz - Hz]

2.2.6 Elektrický spoj

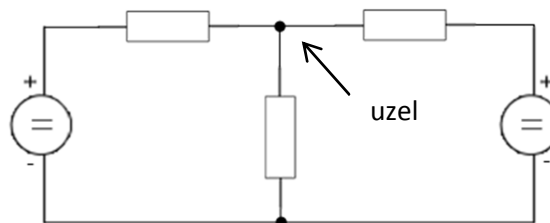
Elektrickým spojem se zajišťuje propojení mezi jednotlivými vývody prvků. Spoj je v editoru realizován jako ideální, bez jakéhokoliv parazitních parametrů v podobě odporu vedení. Ukázka použití spoje v editoru je na obrázku 6.



Obrázek 6. Realizace elektrického spoje

2.2.7 Uzel elektrických spojů

Uzel elektrických spojů slouží pro propojení více prvků nebo jiných uzlů. Uzlem mohou protékat kombinace proudů o různých velikostech, avšak součet hodnot proudů vstupujících do uzlu se musí rovnat součtu hodnot proudů z uzlu vystupujících. Uzel je v editoru realizován jako ideální, bez parazitních parametrů. Na obrázku 7 je ukázka použití uzlu elektrických spojů.



Obrázek 7. Realizace uzlu

2.3 Použité zákony

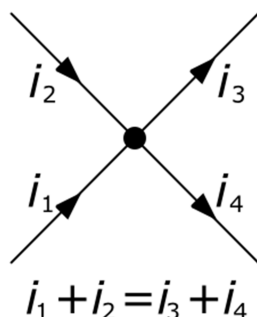
Kapitola pojednává o základních zákonech používaných v elektrotechnice. Tyto zákony jsou nutné pro pochopení další kapitoly, která pojednává o metodách řešení elektrických obvodů.

2.3.1 Ohmův zákon

Ohmův zákon vyjadřuje vztah mezi elektrickým napětím, proudem a elektrickým odporem na libovolné části elektrického obvodu. Proud procházející vodičem je přímo úměrný rozdílu elektrických potenciálů a nepřímo úměrný rezistivitě mezi konci vodiče $R = \frac{U}{I} (\Omega; V, A)$

2.3.2 První Kirchhoffův zákon

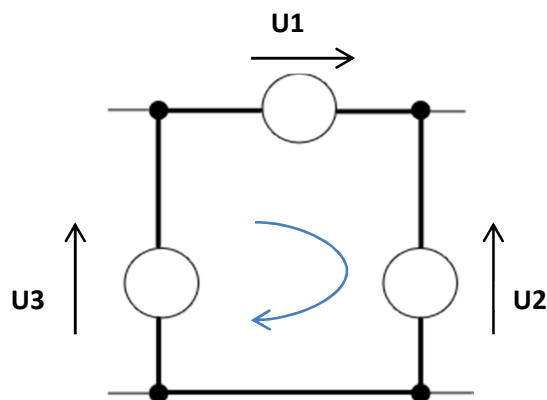
Jedná se o zákon zachování elektrických nábojů. Stejnoseměrný proud je dán elektrickým nábojem, který projde průřezem vodiče za jednu sekundu. Tento náboj se nemůže ve vodiči nikde nahromadit ani vznikat. Dělí-li se proud do několika větví, musí být součet proudů přicházejících do uzlu roven součtu proudů, které z uzlu vycházejí. Proudů, které vstupují do uzlu se označují opačným znaménkem než proudy, které z uzlu vystupují.



Obrázek 8. První Kirchhoffův zákon <<http://cs.wikipedia.org>>

2.3.3 Druhý Kirchhoffův zákon

Je zákonem o zachování energie. Napětí na každém spotřebiči elektrického obvodu je dáno prací potřebnou k přemístění elektrického náboje mezi svorkami spotřebiče. Platí, že algebraický součet všech svorkových napětí zdrojů a všech úbytků napětí na spotřebičích se v uzavřené smyčce rovná nule. Směry úbytků volíme náhodně, jak již bylo řečeno. Oběh podél smyčky volíme a tím získáme znaménka jednotlivých úbytků. Pokud se úbytek shoduje s námi zvoleným směrem oběhu, bereme jej jako kladný, v opačném případě jej bereme záporně. Pro obrázek 10 platí: $\sum U = U_1 + U_3 - U_2 = 0$



Obrázek 9. Druhý Kirchhoffův zákon

2.4 Metody řešení elektrických obvodů

Metod pro řešení elektrických obvodů je několik. Popíšeme si některé z nich, ale pouze dvě dovolují použití algoritmu pro vyčíslení a jsou tedy vhodné pro zpracování na počítači.

2.4.1 Princip lineární superpozice

Pro usnadnění řešení obvodů s několika zdroji elektrické energie je výhodné využít principu lineární superpozice, který platí v lineárních obvodech. Podle tohoto principu řešíme daný obvod postupně, vždy s jedním zdrojem. Přitom ostatní zdroje nahradíme jejich vnitřními odpory. Výsledné napětí působící mezi libovolnými místy obvodu nebo proud procházející kteroukoliv částí obvodu při současném působení všech zdrojů určíme jako součet napětí nebo proudů vypočtených při působení jednotlivých zdrojů samostatně.

2.4.2 Transfigurace hvězda - trojúhelník

Ve složitých obvodech se často objevuje spojení součástek, které není paralelní ani sériové a jedinou možností, jak dané spojení zjednodušit, je převést jej na spojení jiné, které již umožní sériové nebo paralelní spojení v rámci zbytku obvodu. V takovém zapojení lze nalézt spojení tvořící hvězdu nebo trojúhelník, přičemž mezi těmito spojeními je možné libovolně přecházet, aniž by došlo k změně poměru v obvodu nebo k změně hodnot mezi stejnou dvojicí svorek zapojení do trojúhelníka a zapojení do hvězdy.

2.4.3 Metoda uzlových napětí

Metoda uzlových napětí vyžaduje, aby zdroje v obvodu (nezávislé i řízené) byly pouze zdroji proudu. Zdroje napětí je tedy nutno nahradit ekvivalentními zdroji proudu. Tato metoda je vhodná pro zpracování počítačem. Při řešení elektrických obvodů metodou uzlových napětí postupujeme takto:

1. V zapojení označíme jednotlivé uzly (A, B, C ...) a jeden z uzlů zvolíme referenčním
2. Mezi jednotlivými uzly a uzlem retenčním označíme uzlová napětí.

3. Napíšeme rovnici pro každý uzel pomocí I. Kirchhoffova zákona.
4. Proudů v prvcích obvodu vyjádříme pomocí uzlových napětí, napětí zdrojů a odporů (vodivosti) rezistorů. Tím získáme soustavu rovnic.
5. Řešením soustavy rovnic získáme uzlová napětí.
6. Pomocí uzlových napětí vypočítáme proudy a napětí na dílčích prvcích obvodu.

2.4.4 Metoda smyčkových proudů

Obecně vycházíme ze skutečnosti, že jednotlivými nezávislými smyčkami obvodu protékají nezávislé smyčkové proudy. Ve větvích, které jsou společné, teče proud, daný superpozicí (součtem nebo rozdílem) odpovídajících smyčkových proudů. Touto metodou nelze řešit obvody se zdroji proudu. Metoda je vhodná pro vyčíslení na počítači. Při řešení elektrických obvodů metodou smyčkových proudů postupujeme takto:

1. Označíme v každé smyčce smyčkový proud a na každém prvku předpokládáme smysl skutečného proudu
2. Pro každou smyčku sestavíme obvodovou rovnici podle druhého Kirchhoffova zákona. Tím dostaneme soustavu rovnic.
3. Řešením soustavy rovnic vypočteme smyčkové proudy.
4. Skutečné proudy stanovíme smyčkovými proudy, napětí na jednotlivých prvcích pak vypočteme pomocí Ohmova zákona. Vyjde-li nějaký skutečný proud se záporným znaménkem, je jeho smysl opačný, než jsme předpokládali.

2.4.5 Symbolicko-komplexní metoda

Matematické řešení obvodů se střídavým proudem bylo podstatně zjednodušeno tím, že pro časové vektory byly zavedeny matematické výrazy, které početně vyjadřují polohu časových vektorů v Gaussově rovině komplexních čísel. Metodu, která převádí počítání s harmonickými veličinami na počítání s komplexními čísly, nazýváme *symbolicko-komplexní*. Použitím symbolického počtu se výpočty složitých elektrických obvodů podstatně zjednoduší. Symbolický počet lze použít pro střídavé veličiny sinusového průběhu a pro obvody obsahující pouze lineární prvky. Symbolická metoda však vyžaduje znalost počítání s komplexními čísly.

Pro vektory časových průběhů signálů jsou zavedeny matematické výrazy vyjadřující časovou polohu vektorů. Tyto výrazy mohou být v různých tvarech, jež se liší svojí vhodností pro provádění různých matematických operací.

Složkový (algebraický) tvar komplexních čísel je možné vyjádřit jako $A = a + jb$, kde $j^2 = -1$. Složka a se označuje jako reálná, b jako imaginární. Složkový tvar komplexních čísel se hodí zejména pro provádění operací sčítání a odčítání, kdy se sčítají (odčítají) zvlášť reálné a imaginární složky sčítaných (odčítaných) komplexních čísel.

Goniometrický tvar komplexních čísel odpovídá zápisu $A = |A|(\cos \alpha + j \sin \alpha)$ a je výhodné použít jej při násobení. Absolutní hodnoty $|A|$ násobených komplexních čísel se násobí a úhly α se sčítají.

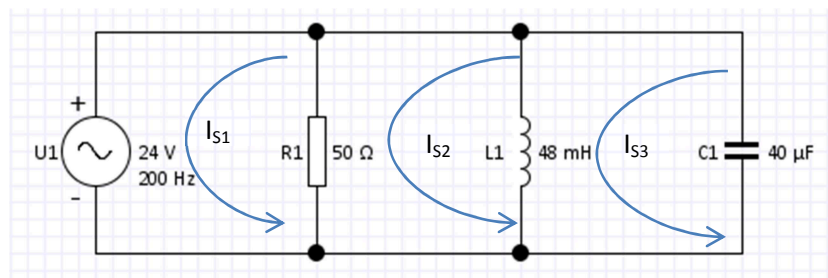
Absolutní hodnotu lze získat ze složkového tvaru vztahem $|A| = \sqrt{a^2 + b^2}$.

Argument komplexního čísla α lze získat ze složkového tvaru pomocí vztahů $\sin \alpha = \frac{b}{|A|}$, $\cos \alpha = \frac{a}{|A|}$, $\tan \alpha = \frac{a}{b}$.

Exponenciální tvar komplexních čísel se zapisuje formou $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$.

Složkový, goniometrický a exponenciální tvar zápisu komplexních čísel jsou navzájem ekvivalentní.

2.4.6 Příklad na řešení obvodů metodou smyčkových proudů



Obrázek 10. Příklad na řešení obvodu metodou smyčkových proudů

Na obrázku 11 je znázorněno elektrická schéma a návrh nezávislých smyček I_{S1} , I_{S2} , I_{S3} . Podle návrhu smyček sestavíme rovnice:

$$I_{S1}(R_1) + I_{S2}(-R_1) = -U_1$$

$$I_{S1}(-R_1) + I_{S2}(R_1 + j\omega L_1) + I_{S3}(-j\omega L_1) = 0$$

$$I_{S2}(-j\omega L_1) + I_{S3}\left(j\omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1}\right) = 0$$

Do rovnic dosadíme konkrétní hodnoty:

$$I_{S1}(50) + I_{S2}(-50) = -24$$

$$I_{S1}(-50) + I_{S2}\left(50 + j\frac{96}{5}\pi\right) + I_{S3}\left(-j\frac{96}{5}\pi\right) = 0$$

$$I_{S2} \left(-j \frac{96}{5} \pi \right) + I_{S3} \left(j \frac{96}{5} \pi - j19,89 \right) = 0$$

Výpočet rovnic provedeme nejjednodušeji pomocí matic. Bude uvedena metoda, která následující matici řeší pomocí determinantů. Tato matice představuje tabulku, kam zapíšeme příslušné koeficienty u neznámých proudů I_{S1} , I_{S2} , I_{S3} . Pravá strana tabulky je tvořena tzv. vektorem pravých stran, jenž je určen nezávislými napěťovými zdroji.

$$\begin{vmatrix} 50 & -50 & 0 \\ -50 & 50 + j \frac{96}{5} \pi & -j \frac{96}{5} \pi \\ 0 & -j \frac{96}{5} \pi & j40,424 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -24 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

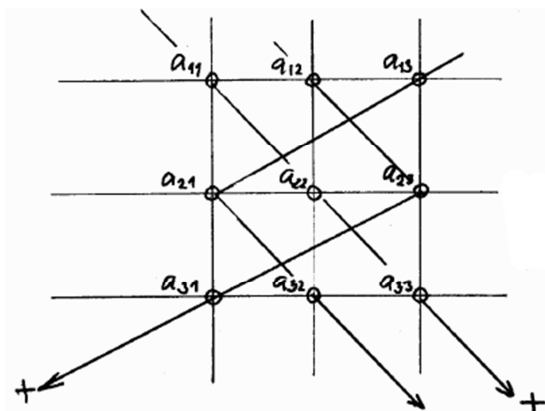
Pro výpočet neznámých veličin, v našem případě proudů, platí obecně vztah:

$$I_n = \frac{D_n}{D}, \text{ kde :}$$

D je determinant soustavy

D_n je determinant, který vznikne z determinantu soustavy, když v něm n-tý sloupec nahradíme vektorem pravých stran, tzn. nezávislými napětími.

Na níže uvedených obrázcích je znázorněn postup výpočtu hodnoty determinantu.



$$a_{11}a_{22}a_{33} + a_{13}a_{21}a_{32} + a_{12}a_{23}a_{31}$$



$$a_{31}a_{22}a_{13} + a_{32}a_{23}a_{11} + a_{21}a_{12}a_{33}$$

$$D = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{13}a_{21}a_{32} + a_{12}a_{23}a_{31} - (a_{31}a_{22}a_{13} + a_{32}a_{23}a_{11} + a_{21}a_{12}a_{33})$$

Obrázek 11. Postup výpočtu hodnoty determinantu [1]

Podle uvedeného postupu výpočtu determinantů bylo vypočteno:

$$\text{Determinant matice } D = 2499,9282 + j785,4$$

$$D_1 = -3599,91384 - j603,48$$

$$D_2 = -3599,91384 + j967,32$$

$$D_3 = -2999,91384 - j942,48$$

Z vypočtených determinantů pak zjistíme jednotlivé smyčkové proudy:

$$I_{S1} = \frac{D_1}{D} = -0,48 - j0,808$$

$$I_{S2} = \frac{D_2}{D} = -j0,808$$

$$I_{S3} = \frac{D_3}{D} = -j1,206$$

Výpočet proudů procházejících jednotlivými prvky:

$$I_{R1} = I_{S1} - I_{S2} = -0,48 \Rightarrow \text{absolutní hodnota } 0,359 \text{ A}$$

$$I_{C1} = I_{S3} = -j1,206 \Rightarrow \text{absolutní hodnota } 1,206 \text{ A}$$

$$I_{L1} = I_{S2} - I_{S3} = j0,398 \Rightarrow \text{absolutní hodnota } 0,137 \text{ A}$$

Výpočet úbytků napětí na jednotlivých prvcích:

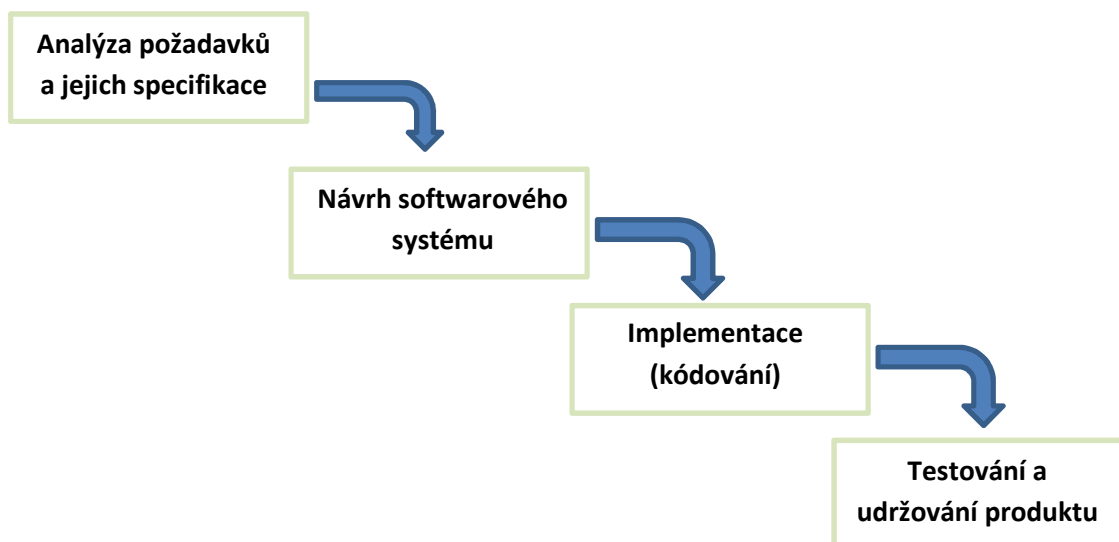
$$U_{R1} = R_1 I_{R1} = 50 * (-0,48) = -24 \text{ V}$$

$$U_{C1} = X_{C1} I_{C1} = -j \frac{1}{2\pi f C_1} * I_{C1} = -23,99 \text{ V}$$

$$U_{L1} = X_{L1} I_{L1} = j2\pi f L_1 * I_{L1} = -24 \text{ V}$$

3 Návrh softwaru

Základem softwarového se stal tzv. vodopádový model. Na obrázku 9 je znázorněno schéma vodopádového modelu.

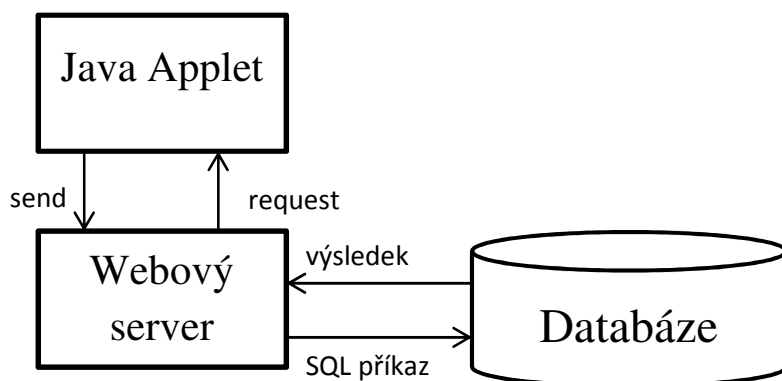


Obrázek 12. Vodopádový model softwarového procesu

Za referenční model považujeme model RUP. V procesu RUP je model softwarového systému vizualizován. Základem pro úspěšné použití principů vizualizace je za průmyslový standard považovaný jazyk UML (Unified Modeling Language) primárně určený pro účely modelování softwarových systémů.

3.1 Analýza požadavků a návrh softwarového systému

Požadavkem je vytvořit systém, který umožňuje kreslení elektrických obvodů, jejich analýzu a testování. Pro přístup do systému musí být zvoleno webové rozhraní přístupné pro více uživatelů. Uživatel nesmí být omezen instalováním dodatečných programů pro správné spuštění a ovládání systému. Musí být umožněno vytvářet nová elektrická schémata a následně ukládat do databáze. Tyto schémata bude možno kdykoliv opětovně načíst a upravovat. Dalším požadavkem je možnost testovat vytvořená schémata, tudíž vytvářet zadání pro vypracování uživatelem. Uživatel musí být procentuálně ohodnocen, jak je úspěšný a tento výsledek si je schopen zobrazit. Na obrázku 14 je vytvořen základní návrh pro realizaci konkrétních požadavků psaných výše.



Obrázek 13. Realizace požadavků

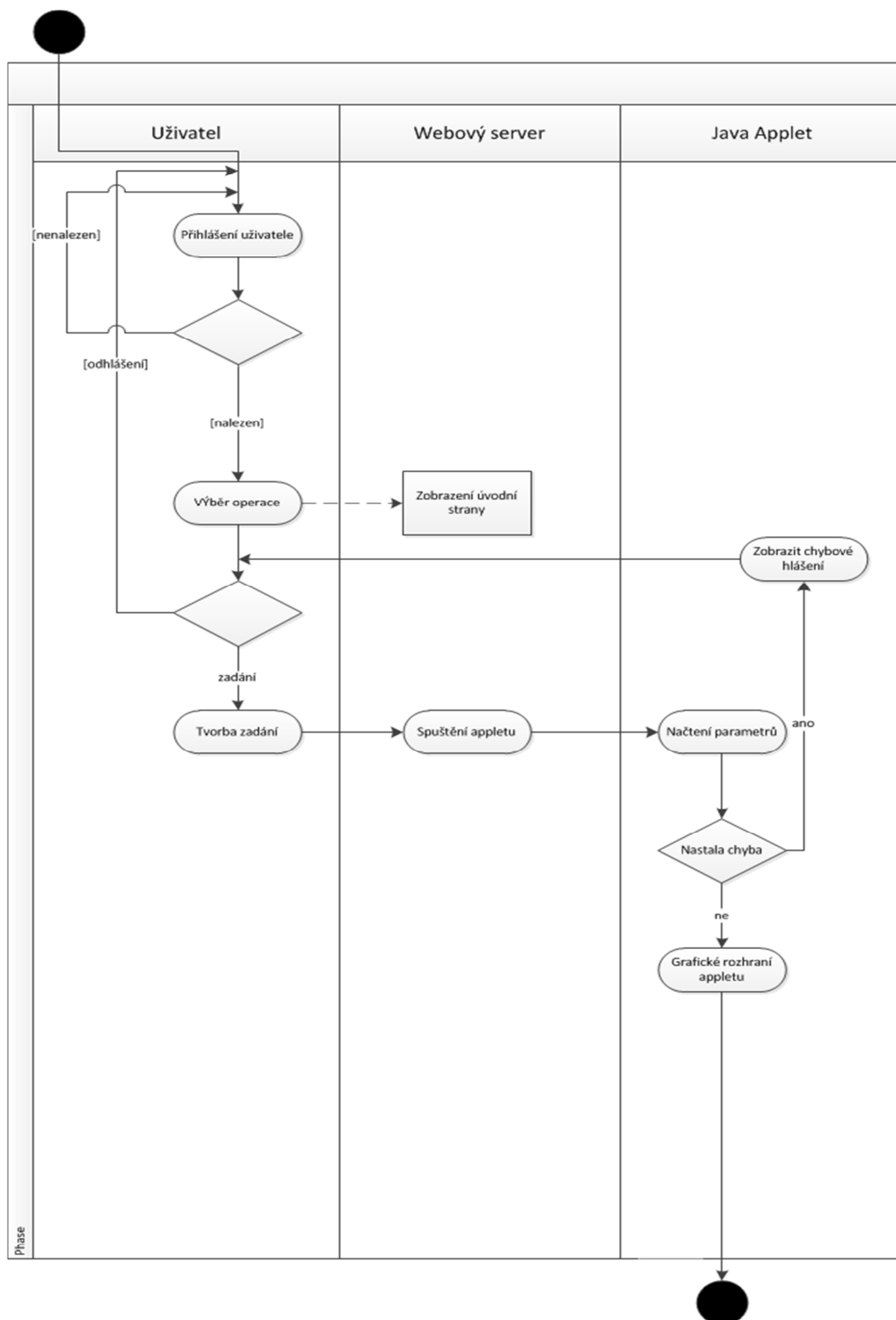
Samotná aplikace je realizována programovacím jazykem Java, konkrétně Java Applet. Java je jedním s nejpoužívanějších programovacích jazyků. Je to objektově orientovaný jazyk, který vyvinula firma Sun Microsystems. Applet je softwarová komponenta, která běží v kontextu webového prohlížeče. Java Applet byl zvolen převážně z důvodu jeho rozšíření. Java Applet se spouští v prostředí Virtual Java Machine, které je obsažené v každé instalaci webového prohlížeče. Znamená to, že odpadá nutnost instalovat dodatečné programy.

Jako webový server obstarávající požadavky systému byl zvolen PHP server. Programovacímu jazyku PHP se dostalo obliby mezi uživateli hlavně kvůli jednoduchosti. Zároveň se vytvořila velká komunita kolem tohoto programovacího jazyku. Odkaz na anglickou dokumentaci k PHP najdeme v literatuře [9]. Pro méně zdatné angličtináře existuje dokumentace i v českém jazyce.

Jako databáze je zvolena relační databáze MYSQL, která vychází z deklarativního programovacího jazyka SQL. Výhodou MYSQL je rychlost, jednoduchost a skutečnost, že je šířena jako Open Source (počítačový software s otevřeným kódem).

3.1.1 Diagram aktivit

Diagram aktivit popisuje jednotlivé procesy pomocí aktivit reprezentujících jeho (akční) stavy a přechody mezi nimi. Přehled a popis prvků diagramů aktivit v literatuře [7]. Obrázek 15 popisuje proces přihlášení uživatele do systému až po spuštění samotného appletu.



Obrázek 14. Diagram aktivit

3.2 Implementace

Cílem implementace je doplnit navrženou architekturu (kostru) aplikace o programový kód a vytvořit tak kompletní systém [7]. V následující kapitole si probereme jeden z nejdůležitějších algoritmů aplikace.

3.2.1 Algoritmus vytváření smyček

Všechny elektrické obvody jsou vypočítávány univerzální metodou smyčkových proudů. Tato metoda vychází ze skutečnosti, že jednotlivými nezávislými smyčkami obvodu protékají nezávislé smyčkové proudy. Nutnost tvorby nezávislých smyček je z důvodu, že při řešení složitějších obvodů již jenom nesprávné množství nutných rovnic velmi komplikuje výpočty a podmiňuje nejednoznačnost řešení, což je v rozporu, neboť řešení musí být vždy jednoznačné. Důkaz, který vede na špatný výpočet elektrického obvodu při použití závislých smyček najdeme v následující kapitole 3.2.2. Pokud bychom nemuseli vytvářet nezávislé smyčky, mohli bychom použít algoritmus procházení stromu, jejichž implementace najdeme na internetu několik.

Pro tvorbu nezávislých smyček byly zkoušeny různé dostupné algoritmy, např. algoritmus hledání nejkratší cesty. Jednou z nejdůležitějších metod hledání nejkratší cesty je Dijkstrův algoritmus. Tento algoritmus vychází z toho, že pro každý vrchol máme proměnnou udávající nejkratší vzdálenost sledu (od počátku). Základem problému je, že algoritmus vynechává některé smyčky, neboť pokud z daného vrcholu vytvoří jednu nejkratší cestu a pokračuje od dalšího vrcholu. Tím může dojít k vynechání některé smyčky.

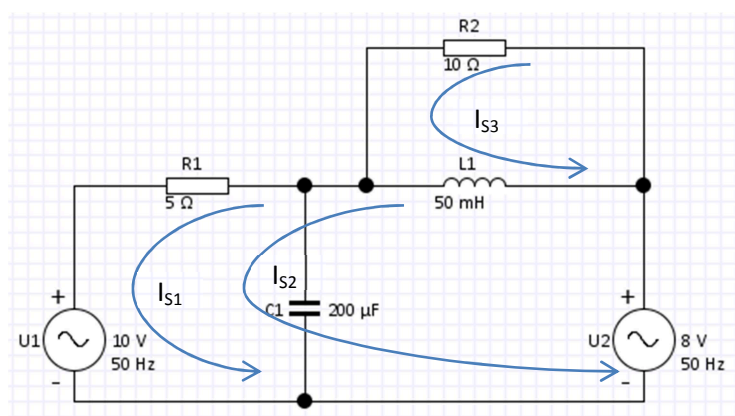
V následujících krocích naznačím zkráceně algoritmus pro samotné vytvoření nezávislé smyčky:

- Uložíme se ID všech uzlů do pole. Toto pole začneme následně procházet.
- Vybereme první uzel a tento uzel zvolíme kořenem.
- Každý uzel má čtyři vstupy. Tyto vstupy jsou realizovány pomocí pole. Pokud od daného vstupu nevede žádná větev, je na tomto vstupu hodnota -1. Pokud na vstupu existuje větev, je vstup označen ID elektrického prvku, který je přímo k uzlu připojen.
- Kontrola, zda daný vstup obsahuje větev (hodnota vstupu není rovna -1) a zda tento vstup není označen jako použitý (už jsme tudy procházeli)
- Následně procházím celou větev, dokud nenarazím na další uzel. Zároveň si ukládám elektrické prvky, nacházející se ve větvi, do pole.
- Pokud jsem narazil na další uzel, tak se rozhoduji, jakým vstupem budu pokračovat tak, abych se dostal zpět ke kořeni a utvořil nezávislou smyčku. Proto si během procházení obvodu ukládám „zlomy“ v elektrickém schématu (kraje) a dle toho se rozhoduji jakým vstupem budu pokračovat

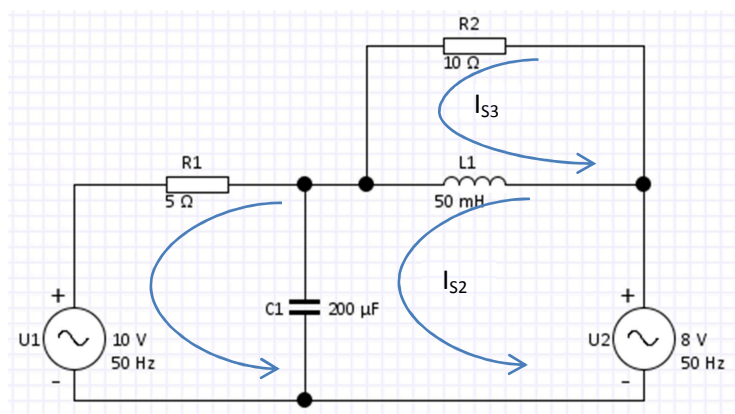
- Jakmile je smyčka vytvořena, tak zkontroluji, zda už taková smyčka nebyla vytvořena, např. v opačném směru. Pokud ne, tak smyčku uložím do pole a označím si vstup kořene, od kterého jsem začal, jako použitý.
- Vytvořené smyčky dosadíme do matice a smyčkové proudy vypočteme pomocí determinantů matice.

3.2.2 Důkaz nutnosti nezávislých smyček

Mějme elektrické obvody znázorněné na obrázku 9 a 10. Obrázek představuje elektrický obvod, v kterém se vyskytuje závislá smyčka I_{S2} . Obrázek 10 představuje elektrický obvod, v kterém jsou jednotlivé smyčky nezávislé.



Obrázek 15. Závislé smyčky



Obrázek 16. Nezávislé smyčky

Výpočtem těchto obvodů jsme dostali výsledky, které jsou v tabulce 1.

	Závislé smyčky	Nezávislé smyčky	Tina	LTspice
I_{R1}	0,6 A	0,359 A	0,359 A	0,352 A
I_{R2}	1,2 A	0,214 A	0,214 A	0,217 A
I_{C1}	0,6 A	0,595 A	0,595 A	0,593 A
I_{L1}	0,764 A	0,137 A	0,136 A	0,134 A

Tabulka 1. Porovnání výsledků s programem LTspice

Porovnáním výsledků jsme ověřili, zda návrh závislých smyček je správným postupem při výpočtu elektrických obvodů univerzální metodou smyčkových proudů. Dokázali jsme, že tomu tak opravdu není. Z tabulky jsou vidět menší odchylky u testování v LTspice způsobené odčítáním hodnot z grafu, které je nepřesné.

4 Ověřování výsledků

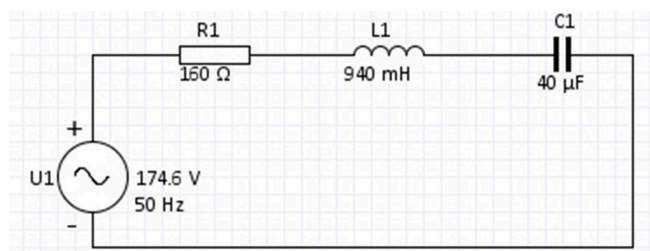
Nezbytným krokem pro ověření správnosti analýzy elektrických obvodů je nutné ověření výsledků s jinými programy, zabývající se rovněž analýzou elektrických obvodů. Výsledky porovnáme také s ručním výpočtem na papíře.

Jedním z programů pro ověření výsledků analýzy je LTspice. LTspice je volně dostupné simulační prostředí společnosti Linear Technology, které mimo své další funkce zvládá právě analýzy elektrických obvodů. LTspice původně pro analýzu využíval metodu uzlových napětí a nedovoloval proto použití ideálních napěťových zdrojů. Současná verze využívá pozměněnou metodu uzlových napětí, která tento nedostatek řeší. Výstupem programu LTspice je graf, ze kterého odečítáme neznámé hodnoty.

Z komerčních nástrojů se osvědčil nástroj Tina Desing Suite [10], který rovněž zvládá stejnosměrnou i střídavou analýzu. Demoverzi je možno vyzkoušet na 30 dní, pak je nutno si tento nástroj koupit. Pro ověření výsledků využíváme zejména funkci multimetru, který při výběru elektrické součástky vypíše konkrétní neznámé hodnoty, v našem případě napětí a proud. Nástroj Tina je možno stáhnout v češtině a při instalaci je možno zvolit, zda schéma součástek chceme podle americké, či evropské normy.

4.1 Příklad na střídavou analýzu

V sériovém spojení RLC stanovte proud a napětí na jednotlivých prvcích. Hodnoty prvků jsou na obrázku 400.



Obrázek 17. Schéma zapojení obvodu se střídavým proudem

Podle Ohmova zákona stanovíme proud procházejícími jednotlivými prvky:

$$I_{R1} = I_{L1} = I_{C1} = \frac{U_1}{R_1 + j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C_1}} = \frac{174,6}{160 + j94\pi - j79,577} = 0,387 - j0,522 \text{ A}$$
$$I_{R1} = I_{L1} = I_{C1} = \mathbf{650 \text{ mA}} \text{ (absolutní hodnota)}$$

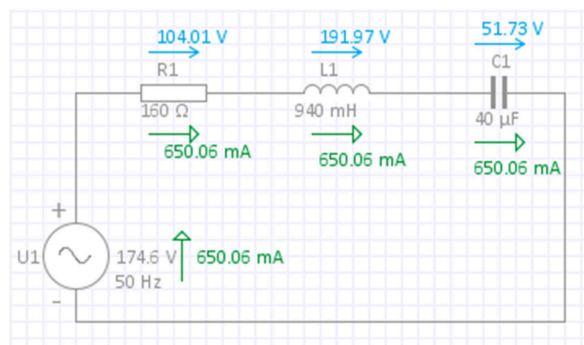
Dopočítáme napětí na jednotlivých prvcích:

$$U_{R1} = R_1 I_{R1} = 160 * 0,65 = 104 \text{ V}$$

$$U_{L1} = X_{L1} I_{L1} = 94\pi * 0,65 = 191,95 \text{ V}$$

$$U_{C1} = X_{C1} I_{C1} = 79,577 * 0,65 = 51,73 \text{ V}$$

Výsledek výpočtu naší aplikací je možno vidět na obrázku 401:



Obrázek 18. Výsledek výpočtu obvodu se střídavým proudem

Výsledky analýzy z programů LTspice a Tina jsou znázorněny v tabulce 2.

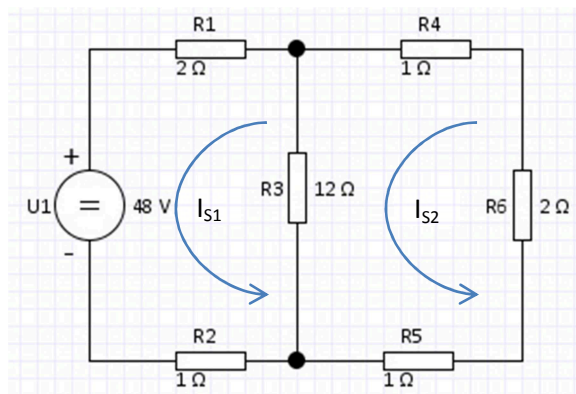
	Tina	LTspice
$I_{R1} = I_{L1} = I_{C1}$	650,06 mA	630,2 mA
U_{R1}	104,01 V	101,23 V
U_{L1}	191,97 V	190,05 V
U_{C1}	51,73 V	50,67 V

Tabulka 2. Výsledek analýzy programů LTspice a Tina

Porovnáním výsledku jsme došli k závěru, že výpočet naší aplikace je do setiny přesný s výpočty programem Tina. I výpočty na papíře se shodují s výpočty naší aplikace až na zanedbatelné setinové odchylky, které vznikly z důvodu zaokrouhlování na 3 desetinná místa. Výsledky z programu LTspice jsou v tomto případě na některých místech nepřesné. Může to být nepřesným odčítáním hodnot z grafu, neboť v LTspice nemáme funkci multimetru jako v programu Tina, kde bychom zjistili přesnou a jednoznačnou hodnotu.

4.2 Příklad na stejnosměrnou analýzu

Určete proud a úbytek napětí na rezistorech R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 . Hodnoty prvků jsou znázorněny na obrázku 402.



Obrázek 19. Schéma zapojení obvodu se stejnosměrným proudem

Na obrázku 402 je zvolený předpokládaný směr smyčkových proudů. Podle těchto smyčkových proudů sestavíme rovnice:

$$I_{S1}(R_1 + R_2 + R_3) + I_{S2}(-R_3) = -U_1$$

$$I_{S1}(-R_3) + I_{S2}(R_3 + R_4 + R_5 + R_6) = 0$$

Do rovnice dosadíme konkrétní hodnoty:

$$I_{S1}(15) + I_{S2}(-12) = -48$$

$$I_{S1}(-12) + I_{S2}(16) = 0$$

Rovnice dosadíme do matice pro výpočet determinantů:

$$\begin{vmatrix} 15 & -12 \\ -12 & 16 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -48 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Z matice jsme vypočítaly tyto hodnoty determinantů:

$$D = 96 \quad D_1 = -768 \quad D_2 = -576$$

Z jednotlivých hodnot determinantů spočteme smyčkové proudy:

$$I_{S1} = \frac{D_1}{D} = -8A$$

$$I_{S2} = \frac{D_2}{D} = -6A$$

Podle vypočtených smyčkových proudů stanovíme proudy procházející jednotlivými rezistory. Pokud je prvek zahrnut v obou smyčkách, jeho hodnotu vypočteme rozdílem těchto dvou smyček. Vypočítali jsme následující hodnoty:

$$I_{R1} = I_{R2} = I_{S1} = -8A$$

$$I_{R3} = I_{S1} - I_{S2} = -2A$$

$$I_{R4} = I_{R5} = I_{R6} = I_{S2} = -6A$$

Jednotlivé proudy vyšly záporně. Znamená to, že směr procházení proudu je opačný než jsme předpokládali.

Když nyní známe dílčí proudy na každém rezistoru, můžeme spočítat úbytek napětí:

$$U_{R1} = R_1 I_{R1} = 2 * 8 = 16V$$

$$U_{R2} = R_2 I_{R2} = 1 * 8 = 8V$$

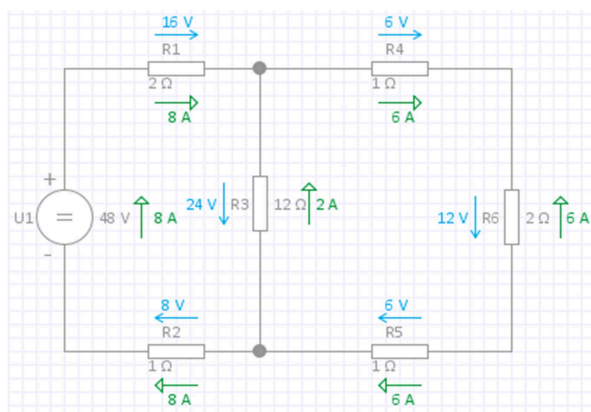
$$U_{R3} = R_3 I_{R3} = 12 * 2 = 24V$$

$$U_{R4} = R_4 I_{R4} = 1 * 6 = 6V$$

$$U_{R5} = R_5 I_{R5} = 1 * 6 = 6V$$

$$U_{R6} = R_6 I_{R6} = 2 * 6 = 12V$$

Výsledek výpočtu naší aplikací je možno vidět na obrázku 403:



Obrázek 20. Výsledek výpočtu obvodu se stejnosměrným proudem

Výsledky analýzy z programů LTspice a Tina jsou znázorněny v tabulce 3.

	Tina	LTspice
$I_{R1} = I_{R2}$	8 A	8 A
I_{R3}	2 A	2 A
$I_{R4} = I_{R5} = I_{R6}$	6 A	6 A
U_{R1}	16 V	16 V
U_{R2}	8 V	8 V
U_{R3}	24 V	24 V
U_{R4}	6 V	6 V
U_{R5}	6 V	6 V
U_{R6}	12 V	12 V

Tabulka 3. Výsledek analýzy programů LTspice a Tina

Jak je zřejmé z tabulky 2, všechny naše výpočty vyšly přesně. Dokázali jsme, že naše aplikace vypočítala elektrický obvod se stejnosměrným proudem správně. Nenalezli jsme žádné odchylky ve výpočtu, které by podmiňovala jednoznačnost řešení.

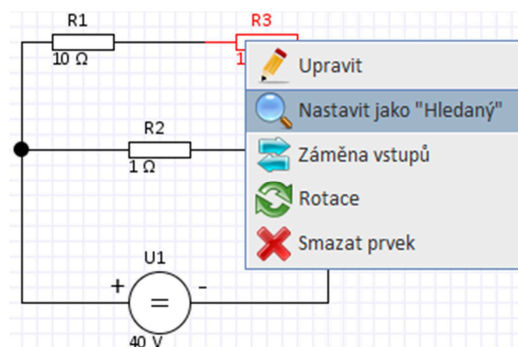
4.3 Porovnání

V předchozích kapitolách jsme vypočítali ukázkové příklady na obvod se stejnosměrným proudem a na obvod se střídavým proudem. Ukázalo se, že program LTspice v obvodu se střídavým proudem vykazuje větší odchylky od ručního výpočtu nebo výpočtu programem Tina. Výstup hodnot a jejich odečet je možný pouze z grafu, což nezpřesňuje výsledek. Odchylky jsou do jisté míry možné i kvůli použití jiných algoritmů pro výpočet smyčkových proudů.

Dokázali jsme, že naše aplikace počítá elektrické obvody správně. Další vypočtené příklady najdeme v příloze A.

4.4 Testování

Ideou testování je testování znalostí studentů v oblasti elektrotechniky formou tvorby zadání, které je vytvořeno učitelem. Zadání je pak přístupné studentům pro jeho vypracování. Výsledkem testování je procentuální úspěšnost řešení daného zadání. Jednou z možností testování je označení elektrických prvků jako „hledaný“. Úkolem studenta je pak najít hodnotu na hledaném prvku. Příklad označení prvku jako hledaný je na obrázku 21.



Obrázek 21. Příklad označení prvku jako „hledaný“

Další možností testování je ruční vložení hledané hodnoty, kterou pak student musí vypočítat a vložit do systému. To je zejména vhodné, kdy úkolem studenta není zjistit hodnotu na hledaném prvku, ale najít například všechny obvodové veličiny v obvodu. Příklad je na obrázku 22.

Vyberte hodnotu	Proud	Zvolte název		Výsledná hodnota		A		IU1=359.63mA IU2=253.84mA	Přidat
									Odebrat
									Odebrat vše

Obrázek 22. Příklad zadání neznámých hodnot

Pro tyto testovací účely bylo vytvořeno webové rozhraní, které běží na serveru Barborka na Vysoké škole Báňské – Technické Univerzitě Ostrava. Stránky běží na internetové adrese <http://barborka.vsb.cz/~sme204>. Přihlášení do systému je realizováno prostřednictvím LDAP serveru <ldaps://ldap.vsb.cz/>. Přihlášení je rozděleno do rolí učitel – student. Učitel má plný přístup do systému. Jsou umožněny funkce pro tvorbu zadání, jeho vypracování, výsledek testu a další. Role studenta je omezena pouze na vypracování daného zadání a zobrazení výsledku testu. Podrobnější informace pro přihlášení do systému, tvorby zadání, tvorby zapojení apod. jsou v manuálu, který je přiložen na CD.

5 Závěr

Cílem řešení je aplikace, která je vhodná pro testování studenty středních škol z oblasti elektrotechniky. Pro možnosti testování byly vytvořené webové stránky na serveru Barborka. Pro ukládání zadání a výsledky testů byla implementována databáze MySQL. Jako formu ukládání a načítání zadání jsme zvolili XML. Samotná aplikace je implementována v jazyce Java jako Applet. Testovat můžeme jak obvody se stejnosměrným, tak střídavým proudem v ustáleném stavu. Pro výpočet obvodu byla zvolena univerzální metoda smyčkových proudů, která je vhodná pro vyčíslení na počítači.

Hlavním přínosem této práce je ověřování znalostí studentů v oblasti elektrotechniky. Důraz byl kladen na uživatelskou přívětivost a jednoduchou navigaci v samotném appletu. Pro ověření studentových výsledků slouží webové stránky na adrese <http://barborka.vsb.cz/~sme204>, kde si student může zobrazit výsledek svého zapojení a vidět, jak je úspěšný. Dalším přínosem je možnost tvořit elektrická schémata a provádět analýzu obvodu, aniž bychom museli analýzu provádět v laboratoři, což je z časového hlediska náročné.

Během vypracování této práce byl vypracován vědecký článek ve spolupráci vedoucím bakalářské práce, panem Ing. Martin Němec, Ph.D. Článek byl vypracován jak v českém, tak anglickém jazyce a obsahoval náměty na budoucí vývoj systému, o kterém je tato práce.

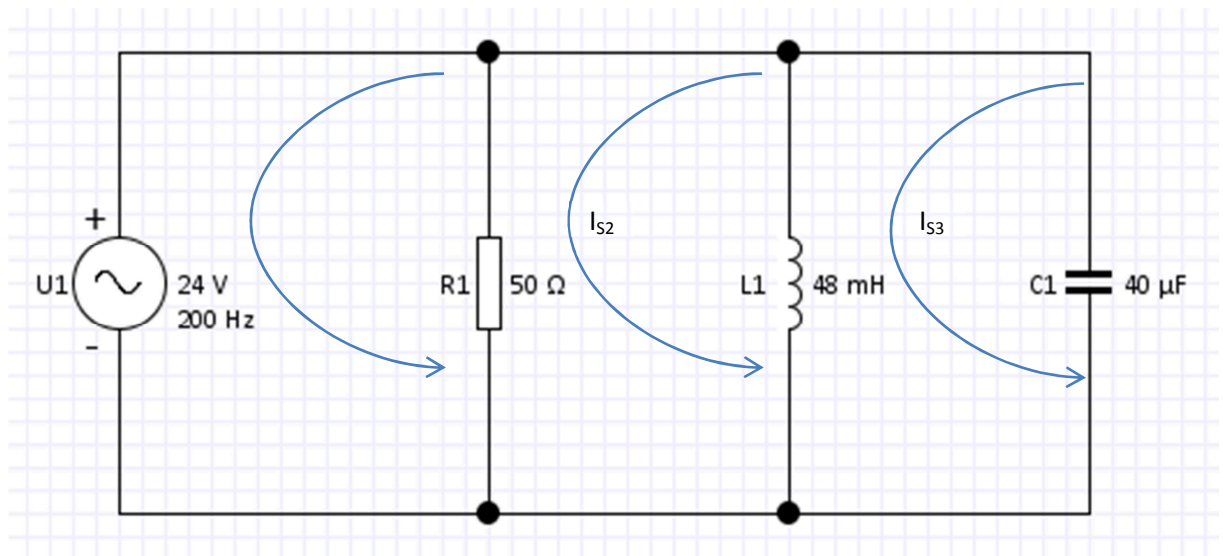
Pro možnosti dalšího vývoje modulu bylo třeba zajistit, aby modul byl dále rozšiřitelný. Aktuálně modul pracuje s elektrickými obvody v ustáleném a harmonicky ustáleném stavu. V dalších fázích vývoje by mohl být rozšířen o přechodné děje, kde je nutný popis obvodových veličin pomocí časové funkce. Tím bychom mohli analyzovat elektrický obvod před sepnutím a po sepnutí obvodu. Příkladem může být nabíjení a vybíjení kondenzátoru v určitém čase. Pro tyto účely by v modulu přibyla časová proměnná, t a elektrická součástka „spínač“. Pro řešení přechodného jevu bychom volili Fourierovu nebo Laplaceovu transformaci, které jsou vhodné pro libovolně složité obvody. Samotný výpočet pak vede na diferenciální rovnice n řádu.

Literatura

- [1] Ing. Pavel Langhammer, Ph.D., *Přednášky: Základy elektroniky* (VŠB-TU Ostrava), 2007
- [2] Ing. Antonín Blahovec, *Elektrotechnika I* (Informatorium, Praha), 2010, ISBN 978-80-7333-043-9
- [3] Ing. Antonín Blahovec, *Elektrotechnika II* (Informatorium, Praha), 1997, ISBN 80-86073-19-X
- [4] Ing. Jan Mařátko, *Elektronika* (Idea Servis, Praha), 2002, ISBN 80-85970-42-2
- [5] *Programming tutorials and source code examples* [online]. Dostupné z: <http://www.java2s.com>
- [6] Wikimedia Foundation, *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/>
- [7] Prof. Ing. Ivo Vondrák CSc., *Úvod do softwarového inženýrství* (Ostrava), 2002
- [8] LTSpice [online]. Dostupné z: <http://www.linear.com>
- [9] PHP documentation [online]. Dostupné z: <http://www.php.net/manual/en/>
- [10] Tina Design Suite [online]. Dostupné z: <http://www.tina.com/English/tina/>

Příloha A

Příklad č. 1



Podle schématu výše vypočítejte proudy, procházející jednotlivými elektrickými prvky metodou smyčkových proudů.

Podle zvolených smyčkových proudů si napíšeme rovnice:

$$I_{S1}R_1 + I_{S2}(-R_1) = -U_1$$

$$I_{S1}(-R_1) + I_{S2}(R_1 + j\omega L_1) + I_{S3}(-j\omega L_1) = 0$$

$$I_{S2}(-j\omega L_1) + I_{S3}\left(j\omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1}\right) = 0$$

Rovnice dosadíme do matice pro výpočet determinantů:

$$\begin{vmatrix} 50 & -50 & 0 \\ -50 & 50 + j\frac{96}{5}\pi & -j\frac{96}{5}\pi \\ 0 & -j\frac{96}{5}\pi & j40,424 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -24 \\ 8 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Výpočet determinantů:

$$D = 60002,3252$$

$$D_1 = -28801,11612 - j48508,8$$

$$D_2 = -j48508,8$$

$$D_3 = -j72382,8$$

Výpočet smyčkových proudů:

$$I_{S1} = \frac{D_1}{D} = -0,48 - j0,808$$

$$I_{S2} = \frac{D_2}{D} = -j0,808$$

$$I_{S3} = \frac{D_3}{D} = -j1,206$$

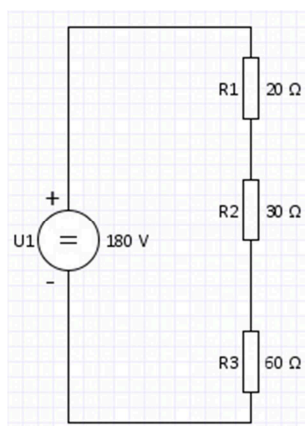
Výpočet proudů procházejících jednotlivými prvky:

$$I_{R1} = I_{S1} - I_{S2} = -0,48 \Rightarrow \text{exp. tvar(modul)} \text{ } 0,48 \text{ A}$$

$$I_{L1} = I_{S2} - I_{S3} = j0,398 \Rightarrow \text{exp. tvar(modul)} \text{ } 0,398 \text{ A}$$

$$I_{C1} = I_{S3} = -j1,206 \Rightarrow \text{exp. tvar(modul)} \text{ } 1,206 \text{ A}$$

Příklad č. 2



Rezistory o odporech $R_1 = 20 \, \Omega$, $R_2 = 30 \, \Omega$, $R_3 = 60 \, \Omega$ zapojíme vedle sebe a připojíme na zdroj $U = 180 \text{ V}$. Určete proudy I_1 , I_2 , I_3 , které procházejí jednotlivými rezistory a úbytek napětí U_{R1} , U_{R2} , U_{R3} .

Rezistory, zapojené v sérii, teče stejný proud, proto platí:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{U_1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{180}{20 + 30 + 60} = 1,64 \text{ A}$$

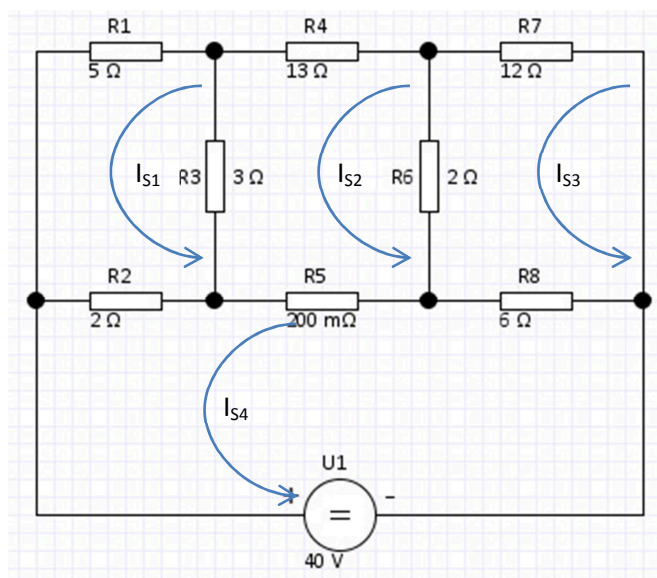
Úbytek napětí spočítáme rovněž pomocí Ohmova zákona:

$$U_{R1} = R_1 I_1 = 32,8 \text{ V}$$

$$U_{R2} = R_2 I_2 = 49,2 \text{ V}$$

$$U_{R3} = R_3 I_3 = 98,4 \text{ V}$$

Příklad č. 3



Určete proudy a napětí na všech členech obvodu.

Zvolíme si smyčkové proudy a napíšeme rovnice:

$$I_{S1}(R_1 + R_2 + R_3) + I_{S2}(-R_3) + I_{S4}(-R_2) = 0$$

$$I_{S1}(-R_3) + I_{S2}(R_3 + R_4 + R_5 + R_6) + I_{S3}(-R_6) + I_{S4}(-R_5) = 0$$

$$I_{S2}(-R_6) + I_{S3}(R_6 + R_7 + R_8) + I_{S4}(-R_8) = 0$$

$$I_{S1}(-R_2) + I_{S2}(-R_5) + I_{S3}(-R_8) + I_{S4}(R_2 + R_5 + R_8) = -U_1$$

Rovnice dosadíme do matice pro výpočet determinantů:

$$\begin{vmatrix} 10 & -3 & 0 & -2 \\ -3 & 18,2 & -2 & -0,2 \\ 0 & -2 & 20 & -6 \\ -2 & -0,2 & -6 & 8,2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -40 \end{vmatrix}$$

Výpočet determinantů:

$$D = 20128$$

$$D_1 = -30720$$

$$D_2 = -11200$$

$$D_3 = -42160$$

$$D_4 = -136800$$

Výpočet smyčkových proudů:

$$I_{S1} = \frac{D_1}{D} = -1,53A$$

$$I_{S2} = \frac{D_2}{D} = -0,556A$$

$$I_{S3} = \frac{D_3}{D} = -2,095A$$

$$I_{S4} = \frac{D_4}{D} = -6,797A$$

Výpočet proudů procházejících jednotlivými prvky:

$$I_{R1} = I_{S1} = 1,53 A$$

$$U_{R1} = R_1 I_{R1} = 5 * 1,53 = 7,65 V$$

$$I_{R2} = I_{S1} - I_{S4} = 5,27 A$$

$$U_{R2} = R_2 I_{R2} = 2 * 5,27 = 10,54 V$$

$$I_{R3} = I_{S2} - I_{S1} = 0,974 A$$

$$U_{R3} = R_3 I_{R3} = 3 * 0,974 = 2,92 V$$

$$I_{R4} = I_{S2} = 0,556 A$$

$$U_{R4} = R_4 I_{R4} = 13 * 0,556 = 7,23 V$$

$$I_{R5} = I_{S2} - I_{S4} = 6,241 A$$

$$U_{R5} = R_5 I_{R5} = 0,2 * 6,241 = 1,25 V$$

$$I_{R6} = I_{S3} - I_{S2} = 1,54 A$$

$$U_{R6} = R_6 I_{R6} = 2 * 1,54 = 3,08 V$$

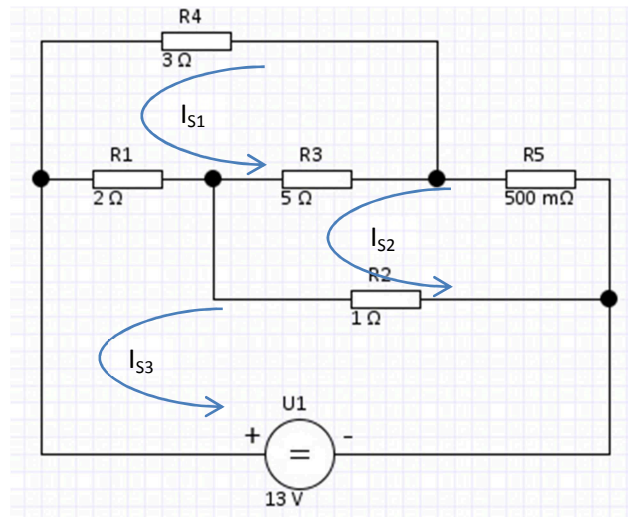
$$I_{R7} = I_{S3} = 2,095 A$$

$$U_{R7} = R_7 I_{R7} = 12 * 2,095 = 25,14 V$$

$$I_{R8} = I_{S4} - I_{S3} = 4,7 A$$

$$U_{R8} = R_8 I_{R8} = 6 * 4,7 = 28,2 V$$

Příklad č. 4



Určete proud procházející rezistorem R_3 .

Zvolíme si smyčkové proudy a napíšeme rovnice:

$$I_{S1}(R_1 + R_3 + R_4) + I_{S2}(-R_3) + I_{S3}(-R_1) = 0$$

$$I_{S1}(-R_3) + I_{S2}(R_2 + R_3 + R_5) + I_{S3}(-R_2) = 0$$

$$I_{S1}(-R_1) + I_{S2}(-R_2) + I_{S3}(R_1 + R_2) = -U_1$$

Rovnice dosadíme do matice pro výpočet determinantů:

$$\begin{vmatrix} 10 & -5 & -2 \\ -5 & 6,5 & -1 \\ -2 & -1 & 3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -13 \end{vmatrix}$$

Výpočet determinantů:

$$D = 64$$

$$D_1 = -234$$

$$D_2 = -260$$

$$D_3 = -520$$

Výpočet smyčkových proudů:

$$I_{S1} = \frac{D_1}{D} = -3,66 \text{ A}$$

$$I_{S2} = \frac{D_2}{D} = -4,06 \text{ A}$$

$$I_{S3} = \frac{D_3}{D} = -8,125 \text{ A}$$

Výpočet proudu rezistorem R_3 :

$$I_{R3} = I_{S1} - I_{S2} = 0,4 \text{ A}$$